施肥对毛红椿幼林生长及叶片生理特征的影响

潘俊彬[1]，刘远生[2]，张露[1*]，程强强[1]，王健[2]，贾婷[1]，吴云燕[1]，郭春兰[1]

（1. 江西农业大学/江西省森林培育重点实验室/江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心，南昌 330045；2. 安福县明月山林场，江西 安福 343200）

摘要：为了探究珍贵树种毛红椿对施用不同肥料不同用量的响应。该文以毛红椿幼林为研究对象，设置氮肥（N）、磷肥（P）、复合肥（CF）及缓释肥（SRF）4 种肥料 3 个施肥水平（高、中、低），研究施肥对毛红椿幼林生长和叶片养分、生理的影响。结果表明：（1）施肥均可促进毛红椿树高和胸径生长，氮肥和复合肥效果更明显，氮肥处理的 4 年生毛红椿平均树高、平均胸径、平均材积较 CK 分别提高了 15.0 %、21.9 %、67.5 %，其中低氮（N1）处理的胸径年均生长量最大（2.99 cm），复合肥处理的平均树高、平均胸径、平均材积较 CK 分别提高了 16.7 %、19.2 %、54.3 %。高缓释肥（SRF3）和低磷（P1）分别在第 4 年树高、胸径的年增长量达到最大（1.96 m、2.33 cm）。（2）施肥显著增加毛红椿叶片叶绿素含量和非结构性碳水化合物含量，氮肥显著促进可溶性糖合成而磷肥显著促进淀粉合成。（3）低氮（N1）和磷肥分别显著促进毛红椿叶片氮和磷含量的提高，磷肥、复合肥和氮肥均可显著提高叶片钾含量。（4）主成分分析结果表明：施肥促进生长效果依次为氮肥＞复合肥＞磷肥＞缓释肥＞对照，其中低氮（N1）即 100 g·株$^{-1}$·年$^{-1}$ 的综合评价值最高。综合施肥成本和效益，施氮肥或复合肥能有效促进毛红椿幼林生长发育，推荐幼林期每年每株施 100 g 氮肥即可。研究结果可为毛红椿造林初期林木养分管理提供参考。

关键词：毛红椿，幼林，施肥，生长，生理

中图分类号：Q945　　　　　　　　**文献标识码：** A

Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of *Toona ciliata* var. *pubescens*

PAN Junbin[1], LIU Yuansheng[2], ZHANG Lu[1*], CHENG Qiangqiang[1], WANG Jian[2], JIA Ting[1], WU Yunyan[1], GUO Chunlan[1]

(1. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture*, *2011 Collaboration Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization*, *Jiangxi Agricultural University*, Nanchang 330045, China; 2. *Anfu County Mingyueshan Forestry Centre*, Anfu 343200, Jiangxi, China)

Abstract: In order to explore the response of the precious tree species *Toona ciliate* var. *pubescens* to different amounts of different fertilizers. In this paper, the young forest of *T. ciliate* var. *pubescens* was taken as the research object. A random block design was used to analyze the effects of fertilization on the growth, leaf nutrients and physiology of young forest of *T. ciliate* var. *pubescens*, and three fertilization levels (high, medium and low) were set, including nitrogen

基金项目：国家自然科学基金（31860202）；国家“十三五”重点研发计划项目（2016YFD060060605）[Supported by National Natural Science Foundation of China (31860202); National Key Research and Development Project（2016YFD060060605）]。

第一作者：潘俊彬（1997-），硕士研究生，研究方向为森林培育，（E-mail）15170700973@163.com。

*通信作者：张露，教授，博士研究生导师，主要从事林木遗传育种和森林培育研究，（E-mail）zhlu856@163.com。

fertilizer (N), phosphorus fertilizer (P), compound fertilizer (CF) and slow release fertilizer (SRF).The results show that: (1) fertilization could promote the height and DBH growth, and the effect of nitrogen fertilizer and compound fertilizer was more obvious.The average tree height, average DBH and average volume of 4-year old with nitrogen fertilizer increased by 15.0%, 21.9% and 67.5% compared with CK, respectively, and the annual average growth of DBH under low nitrogen (N1) treatment was the highest (2.99 cm).Compared with CK, the average tree height, average DBH and average volume of compound fertilizer were increased by 16.7%, 19.2% and 54.3%, respectively.High slow-release fertilizer (SRF3) and low phosphorus (P1) had the largest annual increases in tree height and DBH (1.96m and 2.33 cm) in the 4th year, respectively. (2) Fertilization significantly increased chlorophyll content and non-structural carbohydrate content in leaves of *T. ciliate* var. *pubescens*, nitrogen fertilizer significantly promoted the synthesis of soluble sugar and phosphate fertilizer significantly promoted the synthesis of starch. (3) Low nitrogen (N1) and phosphate fertilizer promote the content of N and P, respectively, and P fertilizer, compound fertilizer and nitrogen fertilizer significantly increased K content in leaves.The principal component analysis showed that the effect of fertilizer to promote growth was nitrogen fertilizer > compound fertilizer > phosphorus fertilizer > slow-release fertilizer > control. Among them, low nitrogen (N1), i.e. 100 g·plant^{-1}·year^{-1}, had the highest comprehensive evaluation value.Comprehensive fertilization cost and benefit, nitrogen fertilizer or compound fertilizer can effectively promote the growth and development of *T. ciliate* var. *pubescens* young forest. It is recommended to apply 100 g nitrogen fertilizer per plant per year in young forest stage.The results can provide a reference for the forest nutrient management in the early stage of afforestation.

Keywords : *Toona ciliate* var. *pubescens*, young forest, fertilization, growth, physiology

毛红椿（*Toona ciliata* var. *pubescens*）为楝科（Meliaceae）香椿属（*Toona*）红椿（*Toona ciliata*）变种，现已归并为红椿，落叶乔木，国家二级保护植物，其木材色泽艳红、纹理美观、速生性好，是良好的单板材和大径材培育树种之一（张露等，2006）。目前主要分布在江西、四川、云南、安徽、湖南、广西等省一些偏远的山区，并呈濒危状态，为此，开展珍贵树种毛红椿人工造林，通过施肥等营林措施，缩短林木的成材年限（Achat et al., 2018；Sullivan et al., 2018），增加资源储备有着重要意义。目前对毛红椿苗期施肥研究探讨较多，如施氮肥或氮磷钾肥和镁肥混施或施钙、镁肥等均可促进毛红椿苗期生长（黄红兰等，2012；刀丽平等，2018；温婷，2019）；低氮高磷对毛红椿幼苗生物量积累最佳，而高氮高磷处理下叶片氮、磷养分含量最高（刘文剑，2021），施钙肥、镁肥会抑制其对氮、钾、钙元素吸收（温婷，2019）等，为毛红椿科学育苗提供了指导，但对毛红椿幼林的养分需求生理机理及施肥效应较少涉及。

林地施肥是林分养分管理中一项重要技术措施，也是培育大径级珍贵树种提高经济效益的重要手段之一，合理施肥对降低林业投入和保护生态环境具有重要意义。目前林木施肥多集中在某一树种氮磷钾配比施肥研究（魏国余等，2020；唐新瑶等，2022），研究结果广谱性低，所以生产中林木施肥多以价格低、肥效快的化肥为主如尿素、复合肥、钙镁磷肥等。研究表明施氮肥可最大促进辣木（*Moringa oleifera*）幼林生长，而磷肥的影响最低（张敏等，2019），复合肥能促进巨桉（*Eucalyptus grandis*）幼林树高及胸径生长（何祯等，2019），而随着施氮量的增加，榉树（*Zelkova schneideriana*）和闽楠（*Phoebe bournei*）幼林的各生长指标呈下降趋势（陆欣远等，2022）。目前一种新型肥料—缓释肥，因其挥发淋溶少及肥效时间长等特点，在容器苗培育中得到广泛应用。施用缓释肥促进薄壳山核桃（*Carya illinoensis*）容器苗生长和根系发育（潘平平等，2019），低用量缓释肥有利于黄连木（*Pistacia chinensis*）

容器苗根系生长（宋协海等，2018），2.5 kg·m^{-3}缓释肥对白木香（*Aquilaria sinensis*）容器苗生长效果最佳（庞圣江等，2018）。以上研究表明，氮肥、磷肥、复合肥和缓释肥等不同肥料种类及不同用量均影响林木生长。

氮磷钾作为植物生长发育所必需的大量元素，在可溶性糖、淀粉等非结构性碳水化合物、光合色素尤其叶绿素等化合物合成、酶活性等生理性状方面发挥着重要作用，影响植物代谢和抗逆性（蒋思思等，2015）。研究发现红锥（*Castanopsis hystrix*）幼林的叶绿素含量、可溶性糖和叶片氮、磷、钾养分含量等在不同氮磷钾配比下具有显著差异，过量施肥会降低可溶性糖含量，磷素增加会抑制叶片钾含量（魏国余等，2020）。施磷肥对鸦胆子（*Brucea javanica*）叶绿素含量影响不显著，但随着施用氮肥量的增加而呈递增趋势（李林锋，2010）。缓释肥处理可显著增加杉木叶片叶绿素、类胡萝卜素含量和磷、钾养分含量，提高叶片最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）等（李玲燕等，2022）。张婉婷（2020）发现短期氮添加促进了红砂（*Reaumuria songarica*）叶片非结构性碳水化合物的积累，而长期过量氮添加对红砂叶片的可溶性糖和淀粉的积累有抑制作用。可见，不同施用量的氮肥、磷肥、复合肥及缓释肥对林木生理及养分吸收均有不同影响。

本研究以毛红椿幼林为研究对象，选用氮肥、磷肥、复合肥及缓释肥 4 种肥料，探究 4 种肥料及用量对毛红椿生长和生理特性的影响，探讨毛红椿幼树的生长生理性状对施肥种类及用量的响应规律，以期筛选出适宜毛红椿幼林生长的最佳施肥种类及其用量，为毛红椿幼林养分管理和科学经营提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省吉安市安福县明月山林场山庄分场（114°43′ E、27°33′ N），属亚热带季风湿润气候，气候温和，雨量充沛，日照充足，年平均气温 17.7 ℃，7 月平均气温 28.9 ℃，1 月平均气温 5.9 ℃，年平均降水量 1 553 mm，平均降雨日 166 d，年日照时数 1 649 h，年无霜期 279 d，土壤为红壤，全氮含量 1.20 g·kg^{-1}，全磷含量 0.25 g·kg^{-1}，全钾含量 15.80 g·kg^{-1}，水解性氮含量 55.17 mg·kg^{-1}，有效磷含量 0.59 mg·kg^{-1}，速效钾含量 67.40 mg·kg^{-1}，pH 值 5.08，有机质含量 14.93 g·kg^{-1}。造林前为杉木采伐迹地，坡度 18°，东南坡，全垦整地，2018 年 1 月造林，株行距 2 m×3 m，造林后每年进行除草扩穴 2 次，连续 4 年。

1.2 试验设计

采用随机区组设计，4 种肥料：氮肥（N）、磷肥（P）、复合肥（CF）和缓释肥（SRF），3 个施肥水平，以不施肥（CK）为对照，共 13 个处理（表 1），施肥量参照浙江楠、南方红豆杉 3 年生容器大苗培育所用肥料比例即缓释肥和复合肥比例为 1:3 以及本底土壤有效磷低等考虑设置高、中、低等 3 个水平（邱勇斌等，2016；王金凤等，2016）。每处理 8 株沿坡纵向单行种植，每处理间距 3 m，随机排列，3 个重复设置在坡的上、中、下三个部位，每重复间隔 9 m。于 2019 年、2020 年和 2021 年的 6 月，在植株上坡位挖 20～30 cm 深半环形沟施肥，填土覆盖，施肥前人工铲除林下杂灌。

表 1 肥料种类及其用量

Table 1 Nutrient ratio and amount of fertilizer types

肥料种类 Fertilizer type	养分配比 Nutrient ratio	处理 Treatment	施肥量 Fertilization amount（g·plant^{-1}·year^{-1}）
氮肥 Nitrogenous fertilizer	N≥46.0%	N1	100
		N2	300
		N3	600
磷肥	P_2O_5≥15.0%	P1	200

		P2	400
		P3	800
复合肥 Complex fertilizer	$N:P_2O_5:K_2O$ =15:15:15	CF1	200
		CF2	400
		CF3	800
缓释肥 Slow release fertilizer	$N:P_2O_5:K_2O$ =13:5:7	SRF1	100
		SRF2	200
		SRF3	300
对照 Contrast	—	CK	0

1.3 测定指标

2018-2021 年连续 4 年每年 12 月及 2021 年 8 月对毛红椿幼树进行每木检尺，测定胸径（DBH）和树高（H），并根据公式（1）（黄红兰等，2020）计算材积（V）。根据 2021 年 8 月的树高和胸径调查数据在每个处理中选取 3 株长势平均的标准木，采集树冠上层生长良好的功能叶，一部分装入自封袋用干冰保存，带回实验室放入-80 ℃冰箱用于测定叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖和可溶性淀粉，一部分杀青烘干后用于叶片氮、磷、钾含量测定。

可溶性糖和可溶性淀粉采用蒽酮比色法，可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 法，叶绿素采用乙醇提取法，烘干叶样用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮法处理后，采用凯氏定氮法测定测定氮含量，紫外分光光度计法测定磷含量，火焰光度计法测定钾含量（于华荣等，2018）。

$$V=0.00005276D^{1.882161}H^{1.009317} \quad (1)$$

式中：V 为单株材积（m^3）；D 为胸径（cm）；H 为树高（m）。

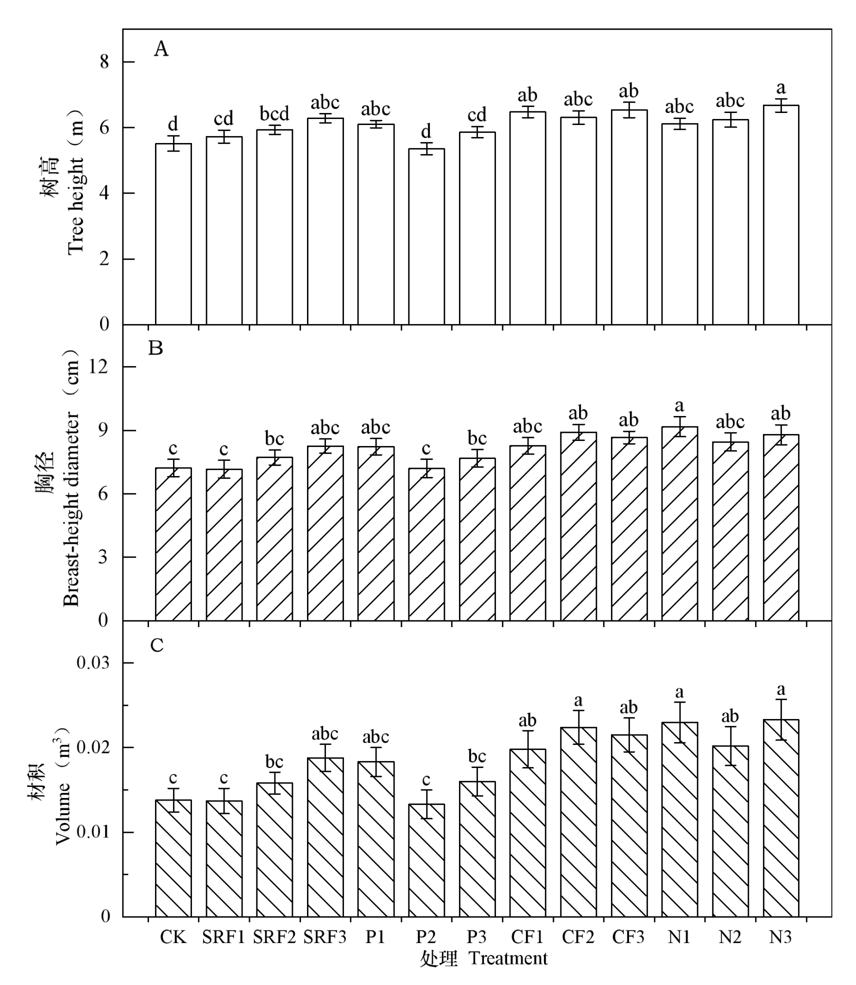
1.4 数据处理

采用 Excel 2019 整理数据，SPSS 25.0 软件用于方差分析和 Duncan 多重比较（P<0.05），Origin 2021 制图，通过降维处理进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 幼林生长对施肥的响应

4 年生毛红椿幼林胸径、树高和材积的方差分析表明，不同施肥处理的生长性状均达显著差异（P < 0.05）（图 1）。施肥促进了胸径和树高生长，且不同处理对施肥响应不一，其中氮肥（N1、 N2、N3）/复合肥（CF1、CF2、CF3）处理下 4 年生平均树高（6.34 m / 6.44 m）、平均胸径（8.81 cm / 8.61 cm）、平均单株材积（0.022 m^3 / 0.021 m^3）较 CK 分别提高了 15.0% / 16.7%、21.9% / 19.2%、67.5% / 54.3%；低磷（P1）和高缓施肥（SRF3）对树高生长有促进作用，分别较 CK 高 10.6%、13.8%。



不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Different small letters indicate significant differences at the level of 0.05. The same below.

图 1 施肥对毛红椿生长的影响

Fig.1 Effects of fertilization on the growth of *Toona ciliate* var. *pubescens*

由表 2 可知，随林龄增加，平均胸径增速基本呈“快—慢”、平均树高增速呈“快—慢—快”的变化趋势。方差分析表明不同林龄不同施肥处理的胸径和树高增速均达显著差异（$P < 0.05$）。除 SRF1 的胸径年均增长量之外，施肥的胸径和树高年均增长量均高于 CK（2.45 cm、1.45 m）。 氮肥和复合肥的胸径和树高年增长促进效果在前两年明显，磷肥和缓释肥处理在第 4 年效果开始显现，且随着缓释肥用量增加效果逐渐增强，低磷（P1）的第 4 年胸径年增长量最大达 2.33 cm，高缓施肥（SRF3）的第 4 年树高年增长量最大（1.96 m）。因此，对造林初期人工林进行施肥可有效提高林分生产力。

表 2 施肥对毛红椿胸径和树高年生长的影响

Table 2 Effect of fertilization on the annual growth increment of DBH and tree height of *Toona ciliate* var. *pubescens*

处理 Treatment	胸径年增长量 Annual growth of DBH（cm）				树高年增长量 Annual growth of height（m）			
	$\Delta D_{2a\text{-}1a}$	$\Delta D_{3a\text{-}2a}$	$\Delta D_{4a\text{-}3a}$	均值 Mean	$\Delta H_{2a\text{-}1a}$	$\Delta H_{3a\text{-}2a}$	$\Delta H_{4a\text{-}3a}$	均值 Mean
N1	3.69±0.24abc	3.02±0.15ab	2.27±0.18a	**2.99**	2.15±0.14ab	1.24±0.14bc	1.45±0.14b	1.61

N2	3.43±0.25abc	2.82±0.21abc	2.02±0.12ab	2.76	2.15±0.13ab	1.48±0.19abc	1.41±0.16b	1.68
N3	3.90±0.24a	2.85±0.21abc	1.94±0.12ab	2.90	2.35±0.12a	1.56±0.17ab	1.65±0.10ab	1.85
CF1	3.23±0.27abc	3.05±0.19ab	1.98±0.12ab	2.75	2.18±0.14ab	1.40±0.19abc	1.87±0.14ab	1.82
CF2	3.83±0.29ab	3.02±0.21ab	2.07±0.39ab	2.97	2.33±0.14a	1.40±0.20abc	1.46±0.17ab	1.73
CF3	3.37±0.27abc	3.17±0.27a	2.26±0.14a	2.93	2.23±0.14ab	1.87±0.25a	1.45±0.17ab	1.85
P1	2.89±0.25c	2.98±0.34abc	**2.33±0.31a**	2.73	1.96±0.19ab	1.37±0.23abc	1.75±0.14ab	1.69
P2	3.12±0.29abc	2.57±0.41ab	2.26±0.49a	2.65	1.93±0.13ab	0.94±0.14c	1.76±0.24ab	1.54
P3	3.03±0.24bc	2.52±0.26abc	1.99±0.13ab	2.51	1.90±0.13ab	1.37±0.24abc	1.63±0.15ab	1.63
SRF1	3.33±0.20abc	2.61±0.27abc	1.28±0.37b	2.41	2.08±0.11ab	0.94±0.12c	1.61±0.15ab	1.54
SRF2	3.61±0.21abc	2.40±0.15abc	1.79±0.13ab	2.60	2.08±0.14ab	1.05±0.13bc	1.63±0.12ab	1.59
SRF3	3.35±0.26abc	2.76±0.21abc	2.10±0.12a	2.74	2.06±0.12ab	1.17±0.14bc	**1.96±0.12a**	1.73
CK	3.23±0.23abc	2.24±0.21bc	1.87±0.20ab	**2.45**	1.83±0.16b	1.06±0.12bc	1.46±0.13ab	**1.45**

注：**ΔD**. 胸径年增长量；**ΔH**. 树高年增长量；**1a**，**2a**，**3a**，**4a** 分别表示林分年龄为 1 年生、2 年生、3 年生、4 年生；不同字母表示在 0.05 水平上差异显著；表中数据为平均值±标准误。下同。

Note: **ΔD**. Mean increment of diameter at breast height; **ΔH**. Mean increment of tree height; **1a, 2a, 3a** and **4a** means the stand age is one year old, two years old, three years old, and four years old, respectively; Different letters represent significant differences at 0.05 level; Date in the table are mean ± standard error. The same below.

2.2 叶片生理特性和养分含量对施肥响应

对 2021 年 8 月份叶片生理指标的方差分析表明，光合色素和非结构性碳水化合物达显著差异（$P < 0.05$）（图 2）。施肥可提高叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、可溶性糖及可溶性淀粉含量，降低叶绿素 a/b 值。施氮肥最有利于叶绿素合成并提高可溶性糖含量，低氮（N1）叶绿素 a 和叶绿素 b 含量较 CK 分别提高 29.5%、68.5%，低氮（N1）和高氮（N3）的可溶性糖含量较 CK 分别提高 41.5%、47.9%；施磷肥对提高可溶性淀粉含量最为明显，其中中磷（P2）的可溶性淀粉含量最高，较 CK 提高 84.6%。低复合肥(CF1）的类胡萝卜素含量较 CK 提高 20.9%。

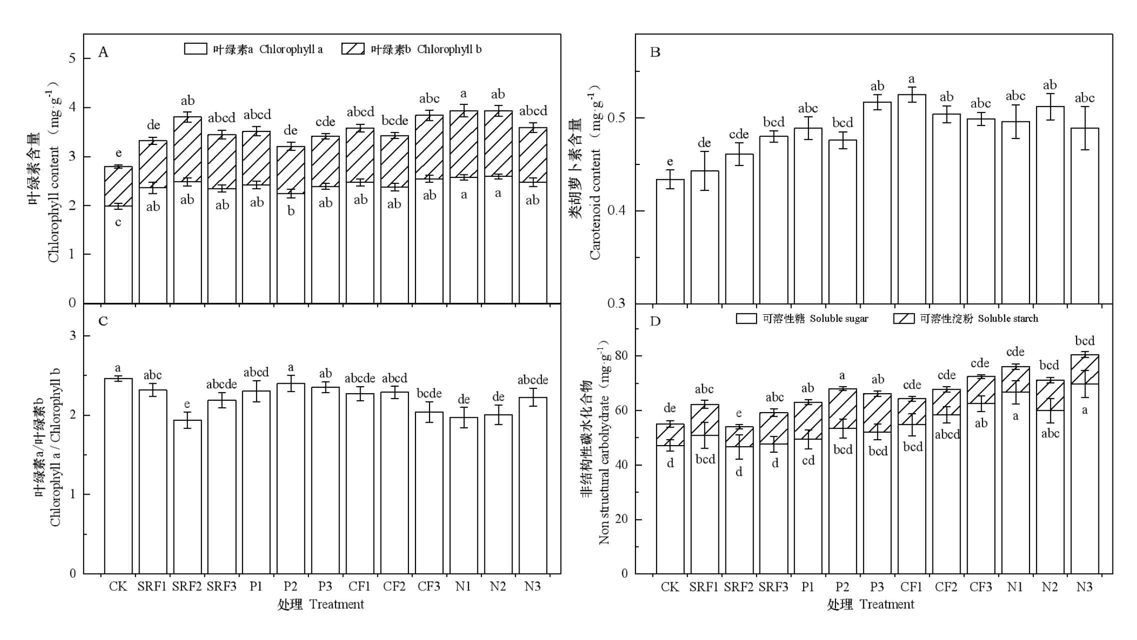


图 2 施肥对毛红椿幼林生理特性的影响

Fig.2 Effects of fertilization on physiological characteristics of *Toona ciliate* var. *pubescens*

对不同施肥处理叶片养分含量的分析发现，施肥均增加了叶片氮、磷、钾含量，其中，低氮（N1）的叶片氮含量最高，较 CK 高 19.3%，磷肥（P1、P2、P3）均可提高叶片磷含量且较 CK 分别提高了 16.3%、13.1%、17.5%，随着施肥量增加，缓释肥处理的叶片氮、磷含量均呈上升趋势。总体来说不同处理的叶片氮含量在 27.19~31.24 mg·g^{-1} 之间，磷含量在 0.191~0.225 mg·g^{-1} 之间，钾含量在 5.83~8.19 mg·g^{-1} 之间，这 3 个指标在不同施肥处理之间均达显著差异（$P < 0.05$）（表 3），表明毛红椿叶片氮磷钾含量对不同施肥具有较高的敏感性。

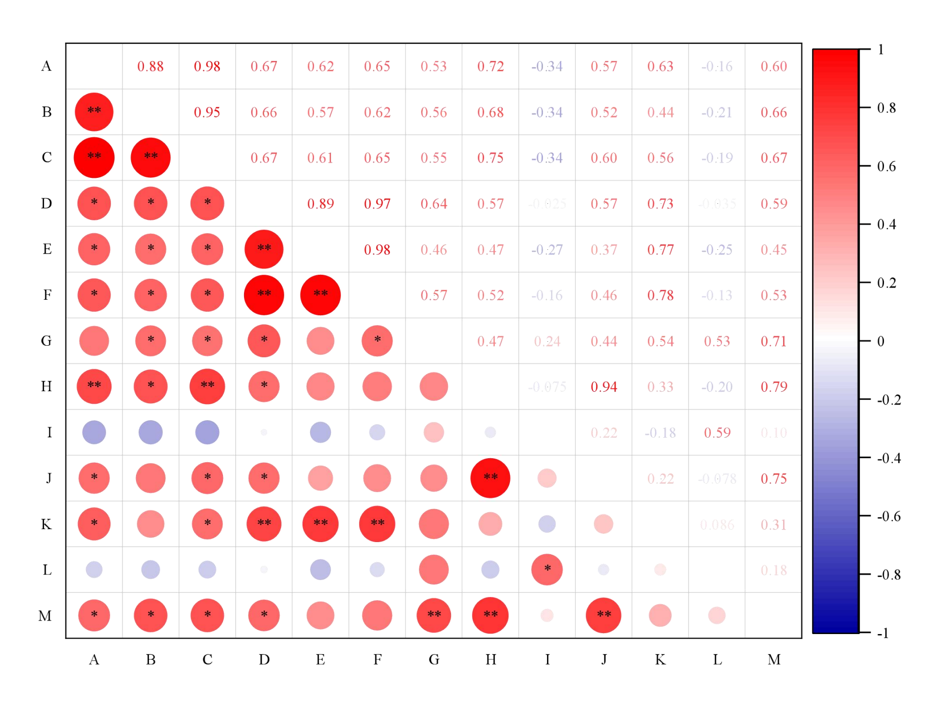
表 3 施肥对毛红椿幼林叶片养分的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on leaf nutrient of *Toona ciliate* var. *pubescens*

处理 Treatment	叶片氮含量 Leaf nitrogen content (mg·g^{-1})	叶片磷含量 Leaf phosphorus content (mg·g^{-1})	叶片钾含量 Leaf potassium content (mg·g^{-1})
N1	31.24±0.85a	0.198±0.005bc	7.24±0.31abc
N2	28.77±0.96abc	0.193±0.003bc	7.60±0.40ab
N3	28.19±0.39bc	0.195±0.002bc	7.87±0.33ab
CF1	29.95±1.01ab	0.222±0.008a	7.60±0.71ab
CF2	28.15±0.96bc	0.210±0.006ab	7.44±0.67ab
CF3	28.60±0.93abc	0.193±0.005bc	8.19±0.81a
P1	28.66±1.09abc	0.223±0.006a	7.08±0.52abcd
P2	27.53±0.78bc	0.217±0.005a	7.19±0.46abc
P3	27.95±0.87bc	0.225±0.007a	6.50±0.55bcde
SRF1	27.19±1.69bc	0.191±0.006c	5.83±0.69de
SRF2	29.26±1.14ab	0.195±0.003bc	6.01±0.45cde
SRF3	29.62±0.68ab	0.198±0.009bc	5.87±0.41de
CK	26.18±1.21c	0.192±0.007c	5.71±0.65e

2.3 相关性分析和主成分分析

相关性分析显示，13 项指标之间均存在显著相关（图 3）。胸径与树高、可溶性糖的正相关性达极显著水平（$P < 0.01$），与叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、非结构性碳水化合物、叶片氮含量、叶片钾含量达显著正相关（$P < 0.05$）；树高与光合色素、可溶性糖和叶片钾含量达显著正相关（$P < 0.05$）；材积与可溶性糖含量的相关系数为 0.75（$P < 0.01$），与光合色素具显著正相关（$P < 0.05$）。叶绿素 a 与可溶性糖的相关系数为 0.57（$P < 0.05$），叶片氮含量与叶绿素含量达极显著正相关（$P < 0.01$），叶片钾含量与类胡萝卜素达极显著正相关（$P < 0.01$），表明生长、生理和养分指标间相互影响，且多呈正相关关系。



表示在 0.01 水平上相关性显著；*表示在 0.05 水平上相关性显著。A**. 胸径；**B**. 树高；**C**. 材积；**D**. 叶绿素 a 含量；**E**. 叶绿素 b 含量；**F**. 叶绿素总量；**G**. 类胡萝卜素含量；**H**. 可溶性糖含量；**I**. 可溶性淀粉含量；**J**. 非结构性碳水化合物；**K**. 叶片氮含量；**L**. 叶片磷含量；**M**. 叶片钾含量。

** indicates significant correlation at 0.01 level ; * indicates significant correlation at 0.05 level.**A**. Breast-height diameter; **B**. Tree height; **C**. Volume; **D**. Chlorophyll a content; **E**. Chlorophyll b content; **F**. Total chlorophyll content; **G**. Carotenoid contents; **H**. Soluble carbohydrate content; **I**. Soluble starch content; **J**. Nonstructural carbohydrates; **K**. Leaf nitrogen content; **L**. Leaf phosphorus content; **M**. Leaf potassium content.

图 3 毛红椿生长、生理和养分指标之间的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between growth, physiological characteristics and nutrient indexes of *Toona ciliate* var. *pubescens*

主成分分析显示，主成分 1、主成分 2 和主成分 3 的贡献率分别为 56.43%、16.62%、12.12%，累积贡献率为 85.16%（表 4）。第 1 主成分除可溶性淀粉和叶片磷含量外，其他指标相关系数均为 0.6 以上，表明第 1 主成分和这些指标均成正相关，其中单株材积的相关系数最高；第 2 主成分与可溶性淀粉、叶片磷含量和类胡萝卜素含量呈正相关；第 3 主成分与叶绿素含量和叶片氮含量呈正相关。根据特征值，对 3 个主成分权重的标准化计算得出每个处理的综合评价值（表 5），综合评价值排前 3 的依次为低氮（N1）、高复合肥（CF3）和中氮（N2），CK 最低，表明氮肥或复合肥对毛红椿生长促进效果好，低氮（N1）处理最佳。

表 4 毛红椿生长和生理及养分指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of growth, physiological and nutrient indexes of *Toona ciliate* var. *pubescens*

特征类别 Factors	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
单株材积 Single tree volume	0.907	-0.167	-0.196
胸径 Breast-height diameter	0.890	-0.179	-0.123
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	0.888	0.051	0.310
叶绿素总量 Total chlorophyll contents	0.867	-0.091	0.400
树高 Tree height	0.859	-0.168	-0.201
叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	0.815	-0.230	0.419
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.807	0.074	-0.506
叶片钾含量 Leaf potassium content	0.776	0.379	-0.307
非结构性碳水化合物 Non structural carbohydrate	0.707	0.277	-0.509
叶片氮含量 Leaf nitrogen content	0.705	-0.055	0.570
类胡萝卜素含量 Carotenoid content	0.699	0.564	0.186
叶片磷含量 Leaf phosphorus content	-0.093	0.855	0.285
可溶性淀粉含量 Soluble starch content	-0.176	0.854	0.007
贡献率 Proportion (%)	56.43	16.62	12.12

表 5 不同施肥处理对毛红椿幼林生长的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation on growth of *Toona ciliate* var. *pubescens* with different fertilization treatments

处理 Treatment	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	综合评价值 Comprehensive evaluation value
N1	3.68	-0.76	0.49	2.36
CF3	3.05	-0.55	-0.74	1.81
N2	2.47	-0.11	0.30	1.66

N3	2.75	-0.05	-2.46	1.46
CF1	1.32	0.94	0.95	1.20
CF2	1.18	0.06	-1.01	0.65
P1	-0.42	1.59	0.78	0.14
P3	-1.30	2.38	0.63	-0.31
SRF2	-0.66	-2.33	2.25	-0.57
SRF3	-0.97	-0.77	1.19	-0.62
P2	-3.13	2.35	-0.33	-1.66
SRF1	-2.67	-0.84	-0.63	-2.02
CK	-5.31	-1.91	-1.42	-4.09

3 讨论与结论

造林初期林木胸径和树高等生长指标是衡量造林成功与否的关键性指标（周强等，2022），合理施肥是维持人工林速生丰产的关键措施。本研究发现在毛红椿人工林快速增长的造林初期，毛红椿生长对不同施肥处理响应不一，肥料类型和施肥量对林木生长有显著影响，氮肥和复合肥施肥效果最明显，尤其是每年每株施 100 g 氮肥（N1）对增加林分生长量最为显著，表明试验区施肥可以有效增加毛红椿造林初期林木生长，这与 4 年生材用樟树（*Cinnamonum camphora*）幼林施复合肥（150 g·株$^{-1}$ 和 225 g·株$^{-1}$）的林分胸径和单株材积增长量均显著高于不施肥（刘新亮等，2020）以及施氮肥促进毛红椿幼苗生长（刀丽平等，2018）结果一致。

施肥对林木生长的影响与多种因素有关，如肥料类型、施肥量的多少、施肥时间、林龄等。本试验区土壤有效磷含量极其匮乏（0.59 mg·kg^{-1}），有研究表明土壤有效磷在不同施肥处理之间变异最大，土壤中有效性最低的元素会制约植物产量（郜建武等，2023），反映出本试验磷肥促进生长效果不理想。尽管不同施肥处理对叶片磷养分含量有显著差异，且高于 CK，但不同施肥处理叶片磷含量（0.191~0.225 mg·g^{-1}）远远低于中国植被叶片磷平均浓度 1.1 mg·g^{-1}（Tang et al., 2018），而不同处理的叶片氮含量（27.19~31.24 mg·g^{-1}）远远高于中国植被叶片氮平均浓度 14.1 mg·g^{-1}，可见氮肥和磷肥是影响毛红椿生长的主要因素，且施氮肥有助于改善叶片养分状况，从而促进林木生长。本研究表明缓释肥效果总体不太显著，这可能与本试验是在毛红椿生长高峰期（7—9 月）之前的 6 月施肥有一定关系，因缓释肥养分释放缓慢（要用 8 个月释放完），释放不及时而造成肥效低，影响林木生长，且缓释肥价格（30 元·kg^{-1} 左右）相对其它 3 种肥料（3~4 元·kg^{-1}）更昂贵，为此参照已有研究设置的缓施肥 3 个水平总体偏低，促进效果不明显，但随着林分年龄增长，高缓释肥（SRF3）对第 4 年树高年生长促进效果最为明显且达到最大（1.96 m），说明施肥量对林木生长影响较大。刘文剑等（2021）研究表明在保证水分充足情况下，早期对毛红椿幼苗施肥应少氮多磷为主，这结果本研究结果不一致，反映出水分是影响苗木养分吸收重要因素，且毛红椿苗期和幼林的不同生长阶段对养分需求可能存在差异。

光合色素能够吸收、传递和转换光能，其含量与组成直接影响叶片的光合速率和光合产物，从而影响植株生长。前人研究发现施肥可显著提高马尾松（*Pinus massoniana*）和黄栀子（*Gardenia sootepensis*）幼苗光合色素含量，降低叶绿素 a/b 比值（罗仙英等，2022；尹梦雅等，2022）。本研究施肥处理的叶片叶绿素及类胡萝卜素含量均高于 CK，叶绿素 a/b 比值小于 CK，其中施氮肥的光合色素含量最高，与黄红兰等（2012）关于毛红椿的研究结果相似，说明施肥能有效促进叶片对光能的转换、捕获和传递能力，促进光合色素合成，从而促进生物量积累，提高林木生长量，且氮素在植物光合色素合成中发挥了重要作用。氮是叶绿素卟啉环与镁离子结合的关键元素，施氮肥有利于植物叶绿素合成，且能增大叶面积，

提高光合效率，从而合成更多的有机物，但过多氮素含量会抑制根系的吸收和运输，一定程度上影响叶绿素合成，故在本研究中低氮（N1）提高叶绿素含量的效果最大。

有研究表明施肥能够促进观光木（*Tsoongiodendron odorum*）叶片可溶性糖合成，同时提高叶绿素含量（唐新瑶等，2022）。本研究结果与之一致，施肥提高了毛红椿叶片可溶性糖和淀粉含量，施氮肥（N1）的可溶性糖含量最高，施磷肥（P2）对提高可溶性淀粉含量最为明显。可溶性糖与植株的生命活动密不可分，磷素与光合作用和碳水化合物的合成有关，可能是由于合理施肥改善了土壤的养分利用状况，叶片内的矿质元素含量增加，有利于叶片的叶绿素合成，从而增强了光合作用，促进营养物质合成积累及生理代谢活动的进行。

毛红椿生长、叶片生理特性及养分含量之间存在紧密相关性。胸径、树高及材积均与光合色素、叶片氮、钾含量显著正相关，说明毛红椿幼林生长与光合作用强弱相辅相成，生长量大的个体可以捕捉和吸收到更多光资源，形成光合色素，较高叶片养分也能促进光合色素合成，促进光合作用，进而提高林木生长。另外，叶绿素 a 与可溶性糖的相关系数为 0.57（$P < 0.05$）达显著相关，叶片钾含量与可溶性糖显著正相关，说明光合色素和叶片钾含量会影响可溶性糖合成，可能是因为光合作用强的个体其生长代谢更加旺盛，进而促进可溶性糖的合成。

主成分分析能够将具有一定相关性的指标，重新组合成一组新的相互无关的综合指标，尽可能地保留了原始变量的信息而又彼此间互不相关（魏国余等，2020），主成分分析得出的综合评价值越高则代表生长质量越好。N1、CF3 和 N2 综合评价值排前 3，说明低中氮肥及高复合肥显著促进毛红椿幼林生长，且施肥量影响施肥效果。随着氮肥施肥量增加促进生长效果降低，可能是因为过量氮元素抑制光合色素形成和非结构性碳水化合物合成（温旭丁等，2021），故综合评价值随着施肥量的增加呈下降趋势。

本研究开展了不同施肥种类和施肥量对毛红椿幼林生长、生理和叶片养分含量影响，结果表明施肥能促进毛红椿幼林生长、光合色素和非结构性碳水化合物合成，改善了叶片养分状况，不同处理对毛红椿胸径和树高年增长量促进效果不同，毛红椿早期生长对氮素有需求，高缓释肥在第 4 年促高效果明显。以施肥人工费 1 350 元·hm^{-2}、尿素 4 元·kg^{-1}、木材 1 000 元·m^{-3} 计，4 年生林分施肥投入产出比达 79%。综合施肥成本和效益，试验区毛红椿幼林以氮肥和复合肥促进效果明显，尤其是低氮量（N1）即每年每株施 100 g 氮肥效果最好。今后需加强施肥对毛红椿幼林及郁闭后生长情况的进一步跟踪调查，以期了解肥效对林分不同生长阶段影响及响应机制。

参考文献：

ACHAT DL, POUSSE N, NICOLAS M, et al., 2018. Nutrient remobilization in tree foliage as affected by soil nutrients and leaf life span[J]. Ecol Monogr, 88(3): 408-428.

DAO LP, LI H, ZHANG CH, et al., 2018. Impact of water and fertilizer control on *Toona ciliate* var. *pubescens* seedlings in Panzhihua dry-hot valleys [J]. J Sichuan For Sci Technol, 39(3): 44-46. [刀丽平，李恒，张春花，等，2018. 攀枝花干热河谷水肥控制对毛红椿(*Toona ciliate* var. *pubescens*)苗期的影响[J]. 四川林业科技，39(3)：44-46.]

HE Z, WANG ZX, FENG BJ, et al., 2019. Fertilization effect on young and middle aged forests of *Eucalyptus grandis* [J]. J Zhejiang Agric Sci, 60(8): 1458-1459. [何祯，王宗星，冯博杰，等，2019. 巨桉中幼林施肥效果试验[J]. 浙江农业科学，60(8)：1458-1459.]

HUANG HL, CAI JH, PENG H, et al., 2020. Selection of tree species mixed with *Toona ciliata* var. *pubescens* and their growth effects in young forests [J]. J For Environ, 40(5) : 497-504. [黄红兰，蔡军火，彭欢，等，2020. 毛红椿混交树种选择及其幼龄林生长效应[J]. 森林与环境学报，40(5)：497-504.]

HUANG HL, YANG ZG, ZHANG L, 2012. A preliminary study on formula fertilization effects to young plantation of *Toona ciliate* var. *pubescens*[J]. J Cent S Univ For Technol, 32(5): 46-49. [黄红兰，杨治国，张露，2012. 毛红椿人工幼林配方施肥的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报，32(5)：46-49.]

JIANG SS, WEI LP, YANG S, et al., 2015. Short term responses of photosynthetic pigments and nonstructural carbohydrates to simulated nitrogen deposition in three provenances of *Pinus tabulaeformis* Carr. seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 35(21): 7061-7070. [蒋思思，魏丽萍，杨松，等，2015. 不同种源油松幼苗的光合色素和非结构性碳水化合物对模拟氮沉降的短期响应[J]. 生态学报，35(21)：7061-7070.]

LI LF, 2010. Effects of formulated fertilizer on photosynthetic characteristics of *Brucea javanica* seedlings[J]. Acta Agric Univ Jiangxi, 32(6): 1136-1141. [李林锋，2010. 氮磷钾配方施肥对鸦胆子幼苗光合特性的影响[J]. 江西农业大学学报，32(6)：1136-1141.]

LIU WJ, JIN JE, LI YJ, et al., 2021. Effects of water, fertilization with different nitrogen and phosphorus ratios on the growth, nutrient distribution and chlorophyll fluorescence characteristics of *Toona ciliate* var. *pubescens* seedlings[J]. Western For Sci, 50(6): 83-90. [刘文剑，金建儿，李彦杰，等，2021. 水分和氮磷配比施肥对毛红椿幼苗生长、养分分配及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西部林业科学，50(6)：83-90.]

LIU XL, LIU L, HE XS, et al., Effects of fertilization and pruning on growth of *Cinnamonum camphora* plantations[J]. J Cent S Univ For Technol, 40(12): 54-59. [刘新亮，刘蕾，何小三，等，2020. 施肥和修枝对材用樟树幼林生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 40(12)：54-59.]

LU XY, WEI XL, TIAN H, et al., 2022. Effects of fertilization on growth and physiology of precious tree species of *Zelkova schneideriana* and *Phoebe bournei* [J]. Mol Plant Breed, 20(1): 310-319. [陆欣远，韦小丽，田鸿，等，2022. 施肥对珍贵树种榉树和闽楠幼树生长及生理的影响[J]. 分子植物育种，20(1)：310-319.]

LUO XY, MO RH, DING GJ, et al., 2022. Effects of different fertilization ratios on the growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings [J]. Guihaia, 42(4): 608-616. [罗仙英，莫荣海，丁贵杰，等，2022. 不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响[J]. 广西植物，42(4)：608-616.]

PAN PP, DOU QQ, TANG WH, et al., 2019. Effects of slow release fertilizer dosage on growth and nutrient contents of *Carya illinoensis* container seedlings [J]. J Nanjing For Univ(Nat Sci Ed), 43(5): 163-168. [潘平平，窦全琴，汤文华，等，2019. 缓释肥用量对薄壳山核桃容器苗生长及养分含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，43(5)：163-168.]

PANG SJ, ZHANG P, MA Y, et al., 2018. Effect of substuate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containeriaed *Aquilaria sinensis* seedlings [J]. J NE For Univ, 46(11): 12-15. [庞圣江，张培，马跃，等，2018. 白木香容器苗基质配比与缓释肥施用量的生长效应[J]. 东北林业大学学报，46(11)：12-15.]

QIU YB, QIAO WY, LIU J, et al., 2016. Influence of container size, substrate and fertilization on big container-growing seedlings quality of *Phoebe chekiangensis* [J]. J NE For Univ, 44(9): 20-23. [邱勇斌，乔卫阳，刘军，等，2016. 容器、基质和施肥对浙江楠容器大苗的影响[J]. 东北林业大学学报，44(9)：20-23.]

SONG XH, GUO HH, LIU Y. et al., 2018. The growth response of *Pistacia chinensis* Bunge containerized seedlings to slow-release fertilizer [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 42(3): 117-122. [宋协海，郭欢欢，刘勇，等，2018. 黄连木容器苗生长对缓释肥的响应[J]. 南

京林业大学学报(自然科学版)，42(3)：117-122.]
SULLIVAN TP, SULLIVAN D, 2018. Influence of nitrogen fertilization on abundance and diversity of plants and animals in temperate and boreal forests[J]. Environ Rev, 26(2): 2017-2026.
TAI JW, WANG XY, ZHANG CX. et al., 2023. Effects of fertilization on the stand growth, soil and leaf nutrients in short-rotation *Quercus acutissima* plantation [J]. J AH Agr Univ, 50(1): 44-49. [邰建武，王新洋，张春祥，等，2023．施肥对麻栎短轮伐期炭用林土壤、叶片养分及林分生长的影响[J]．安徽农业大学学报，50(1)：44-49.]
TANG XY, KANG YC, LIANG XX, et al., 2022. Effects of N, P and K proportional fertilization on the physiological and photosynthetic characteristics of *Tsoongiodendron odorum* seedlings[J]. J NW For Univ, 37(4): 37-42. [唐新瑶，亢亚超，梁喜献，等，2022．氮磷钾配比施肥对观光木幼苗生理与光合特性的影响[J]．西北林学院学报，37(4)：37-42.]
TANG ZY, XU WT, ZHOU GY, et al., 2018. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 115(16): 4033-4038.
WANG JF, CHEN ZM, LIU JX, et al., 2016. Effects of different substrates and slow-release fertilizers loading on growth of *Taxus chinensis* var. *mairei* container ssplings [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 36(2) : 74-78. [王金凤, 陈卓梅, 刘济祥, 等, 2016. 不同基质及缓释肥对南方红豆杉容器大苗生长的影响[J]. 浙江林业科技, 36(2) : 74-78.]
WEI GY, KANG YC, LIAO X, et al., 2020. Effects of formula fertilization on the physiology characteristics and leaf nutrient nontent of *Castanopsis hystrix* stands[J]. J NW For Univ, 35(04): 32-36. [魏国余，亢亚超，廖曦，等，2020．配方施肥对红锥幼林生理及叶片养分含量的影响[J]．西北林学院学报，35(4)：32-36.]
WEN T, 2019. Effects of calcium fertilizer and magnesium fertilizer on photosynthetic characteristics and nutrients of *Toona ciliate* var. *pubescens* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [温婷，2019．钙、镁肥对毛红椿幼苗光合特性及养分的影响[D]．南昌：江西农业大学.]
WEN XD, CHEN H, 2021. Study on application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization in *Sonneratia hainanensis* seedling cultivation .[J]. J For Environ, 41 (4): 351-357. [温旭丁，陈花，2021．海南海桑幼苗氮磷钾施肥量分析[J]．森林与环境学报，41(4)：351-357.]
YIN MY, LI ZH, YANG Y, et al., 2022. Effects of fertilization on growth and photosynthetic characteristics of *Gardenia jasminoides* seedlings[J]. J NE For Univ, 50(5): 32-36. [尹梦雅，李志辉，杨艳，等，2022．施肥对黄栀子幼苗生长与光合特性的影响[J]．东北林业大学学报，50(5)：32-36.]
YU HR, GUO Y, ZHU AM, et al., 2018. Effects of nitrogen fertilizer level on non-structural carbon and nitrogen metabolism level in oats grown in sandy desert soil[J]. Acta Pratac Sin, 27(5): 61-72. [于华荣，郭园，朱爱民，等，2018．氮素水平对沙地燕麦叶片非结构性碳氮代谢的影响[J]．草业学报，27(5)：61-72.]
ZHANG L, GUO LH, DU TZ, et al., 2006. The effects of shading and soil water content on photosynthesis of *Toona ciliate* var. *pubescens* seedlings[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 49(5): 63-66. [张露，郭联华，杜天真，等，2006．遮荫和土壤水分对毛红椿幼苗光合特性的影响[J]．南京林业大学学报(自然科学版)，49(5)：63-66.]
ZHANG M, YANG HY, BAO L, et al., 2019. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio

fertilization on growth and leaf nutrient absorption of *Moringa oleifera* [J]. For Res, 32(5) : 114-120. [张敏，杨浩瑜，包立，等，2019．氮、磷、钾配比施肥对辣木生长及叶片养分吸收的影响[J]．林业科学研究，32(5)：114-120.]

ZHANG WT, 2020. Effects of rainfall changes and nitrogen addition on the unstructured carbohydrates and stoichiometric characteristics of *Reaumuria soongorica* seedlings [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [张婉婷，2020．降雨变化和氮添加对红砂幼苗非结构性碳水化合物及化学计量特征的影响[D]．兰州：甘肃农业大学.]

ZHOU Q, HUANG GH, ZHANG SX, et al., 2022. Response of early growth of different *Tectona grandis* clones to different fertilizer application [J] J NE For Univ, 50(7): 6-10. [周强，黄桂华，张绍祥，等，2022．肥料施肥对不同柚木无性系早期生长的影响[J]．东北林业大学学报，50(7)：6-10.]